Aus dem Anaesthesie-Zentrum der Universitätskliniken Marburg
Direktor: Professor Dr. med. H. Oehmig

VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN DER CO_2-ABSORPTION VERSCHIEDENER ATEMKALKE IN ABSORBERN UNTERSCHIEDLICHER BAUART UND WIDERSTANDSÄNDERUNGEN IN DEN SYSTEMEN WÄHREND DER CO_2-ABSORPTION

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
der gesamten Medizin des Fachbereiches Medizin
der
Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von
Heinz Büchsel
aus Wixhausen

Marburg 1973

Aus dem Anaesthesie-Zentrum der
Universitätskliniken Marburg
Direktor: Professor Dr. med. H. Oehmig

Vergleichende Untersuchungen der CO_2-Asorption verschiedener Atemkalke in Absorbern unterschiedlicher Bauart und Widerstandsänderungen in den Systemen während der CO_2-Absorption

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung des Doktorgrades
der gesamten Medizin des Fachbereiches Medizin

der

Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von
Heinz Büchsel
aus Wixhausen

Marburg 1973

Angenommen vom Fachbereich Humanmedizin
der Universität Marburg am 10.7.1973

gedruckt mit Genehmigung des Fachbereiches

Dekan: Prof. Dr. med. H. Oepen
Referent: Prof. Dr. med. H. Oehmig
Correferent: Prof. Dr. med. K. Müller

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Druck: dipa-Verlag, 6 Frankfurt/Main, Tel.: 55 61 88

Inhaltsverzeichnis

		Seite
I.	Einleitung	2
II.	Chemische Grundlagen für den Atemkalk	3
	a) Verbindungen, die zur CO_2-Absorption fähig sind	3
	b) Die Neutralisation, die Grundreaktion des Absorberkalkes	4
	c) Die Reaktion im Absorber	5
III.	Der Atemkalk	7
	a) Anteil des Natriumhydroxids im Atemkalk	7
	b) Die Härtung des Atemkalkes	7
	c) Die Körnchenbeschaffenheit	8
	d) Die chemische Zusammensetzung der Atemkalke	9
IV.	Untersuchung der CO_2-Absorption verschiedener Atemkalke in Absorberkanistern unterschiedlicher Bauart	10
	a) Versuchsanordnung	10
	b) Versuchsdurchführung	12
	c) Versuchsergebnisse	15
	d) Diskussion	24
V.	Widerstandsänderungen in Absorbern während der CO_2-Absorption	26
	a) Die physikalischen Voraussetzungen	26
	b) Die Versuchsanordnung	28
	c) Die Versuchsdurchführung	29
	d) Die Versuchsergebnisse	30
	e) Diskussion der Versuchsergebnisse	30
VI.	Zusammenfassung	32
	Literaturverzeichnis	33

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung

Der Atemkalk wurde in dem Moment ein nötiger Bestandteil der Narkoseausrüstung, als man anfing, nicht mehr alle vom Patienten ausgeatmeten Gase ausströmen zu lassen, sondern sie zum großen Teil dem Patienten wieder zuzuführen. Dazu wurde es nötig, die im Ausatemgas enthaltene Kohlensäure zu eliminieren.
Die Verwendung von Kalk zur Kohlensäureabsorption hat eine lange Geschichte.
Schon 1777 benutzte der schwedische Chemiker Scheele Kalkwasser, um CO_2 zu absorbieren. Acht Tage lang hielt er Bienen in einem Glasgefäß, das umgekehrt in Kalkwasser stand. 1847 verfuhren Regnault und Reiset nach dem gleichen Prinzip. Sie hielten Hunde in einem geschlossenen Raum, Sauerstoff wurde zugeführt und Kohlensäure durch Kalk entzogen.
Als erster baute Franz Kuhn 1906 einen Apparat mit CO_2-Absorption durch Natriumhydroxid. Dieses Gerät war allerdings für Bergleute gedacht.
Den ersten Narkoseapparat fertigte D.E. Jackson 1915. Sein System hatte einen Behälter mit einer Flüssigkeit, bestehend aus Natronlauge und Calciumhydroxid, durch die die Ausatemluft geleitet wurde.
Als dann das Drägerwerk 1922/23 ein Kreissystem nach Gaus-Wieland vorstellte, und Waters 1924 seine ausgedehnten Versuche mit dem Pendelatmungssystem machte, waren die Absorber und der Atemkalk bald nicht mehr von der Narkoseausrüstung wegzudenken.

II. Chemische Grundlagen für den Atemkalk

a) Verbindungen, die zur CO_2-Absorption fähig sind

Der Atemkalk besteht heute meistens aus einem Gemisch von Calciumhydroxid und Natriumhydroxid, bzw. Bariumhydroxid.
Oxide, Peroxide und Hydroxide von Metallen sind in der Lage CO_2 zu absorbieren. Die Reaktion verläuft um so schneller, je schneller die Metalle ihre Hydroxide bilden.
Der Platz in der elektromotorischen Spannungsreihe verdeutlicht das. Die Hydroxide der Alkalimetalle und der Erdalkalimetalle nehmen die ersten Positionen in der Spannungsreihe ein, d.h. sie sind diejenigen Metalle, die am leichtesten reagieren.
In bezug auf ihre Reaktionsfreudigkeit stehen die Alkalimetalle in folgender Reihenfolge:
Caesium, Rubidium, Kalium, Natrium und Lithium.
Bei den Erdalkalimetallen, die weniger schnell reagieren, ist die Reihenfolge:
Barium, Strontium, Calcium und Magnesium.
Andere Metalle kommen für die Verwendung zur Kohlensäureabsorption in Narkosegeräten nicht in Frage, da ihre Hydroxide entweder unlöslich sind, oder sie sind so schwach basisch, daß sie nur schlecht mit der schwachen Kohlensäure reagieren.

b) Die Neutralisation, die Grundreaktion des Absorberkalkes

Die chemische Reaktion, die bei der CO_2-Absorption stattfindet, ist eine Neutralisation. Aus Säure und Base entstehen ein Salz und Wasser:

$$H_2CO_3 + 2\,NaOH - Na_2CO_3 + 2\,H_2O$$

oder

$$H_2CO_3 + Ba(OH)_2 - BaCO_3 + 2\,H_2O$$

Bei der Neutralisationsreaktion entsteht Wärme. Die entstehende Wärme schwankt je nach dem Grad der Ionisation:
Die Hydroxide der Alkalimetalle und Erdalkalimetalle sind starke Basen, d.h., sie liegen in wässriger Lösung in dissoziiertem Zustand vor. Obwohl die Kohlensäure eine schwache Säure ist, verläuft die Reaktion mit diesen Basen rasch, da das Dissoziationsgleichgewicht aufrecht erhalten bleibt. Die Menge der schwachen Säure, die zur Reaktion benötigt wird, ist die gleiche, als wenn eine starke Säure vorläge. Nur wird bei einer schwachen Säure ein Teil der Neutralisationswärme zur Ionisation verbraucht. Dadurch liegt die Neutralisationswärme etwas niedriger, als es der eigentlichen Neutralisationsreaktion entspräche (13700 Kal/mol Wasser). Sie liegt bei 13400 Kalorien pro mol Wasser (18g) (ADRIANI)
Die Hydroxide der Alkalimetalle sind gut wasserlöslich. Aber sie sind sehr stark hygroskopisch.
Die Hydroxide der Erdalkalimetalle sind nicht mehr so gut wasserlöslich wie die der Alkalimetalle.

Trotzdem sind die Lösungen starke Basen, da sie weitgehend ionisiert vorliegen.

c) Die Reaktionen des Absorberkalkes

Natriumhydroxid ist relativ einfach zu gewinnen und ist sehr reaktionsfreudig. Als alleiniges Absorbens ist es für den Gebrauch in der Klinik jedoch nicht verwendbar, da es zu stark hygroskopisch ist, und so die Feuchtigkeit aus der Ausatemluft vollständig aufnimmt.
In den Narkose-Kreissystemen soll aber eine hohe relative Feuchte herrschen. Diese ist sehr wichtig, damit der Patient perspiratorisch nicht zu viel Flüssigkeit verliert. Zum anderen benötigt der Atemkalk, wie weiter unten noch ausgeführt, Feuchtigkeit, damit die Reaktionen schneller ablaufen.
Auf der anderen Seite wurde festgestellt, daß die Wirksamkeit des Calciumhydroxids beträchtlich erhöht werden konnte, wenn man ihm einen Teil Natriumhydroxid beimischte.
Die chemischen Reaktionen im Absorber spielen sich wie folgt ab:
Das Kohlendioxid löst sich in Wasser zur Kohlensäure

$$CO_2 + H_2O - H_2CO_3$$

Diese Säure reagiert mit dem Natriumhydroxid

$$H_2Co_3 + 2\ NaOH - Na_2CO_3 + H_2O + \text{Wärme}$$

Das nun entstandene Natriumcarbonat bildet unter Reaktion mit dem Calciumhydroxid Calciumcarbonat und Natriumhydroxid

$$Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 - CaCO_3 + 2\ NaOH$$

Diese Reaktion erklärt die "Regeneration" des Atemkalkes. Atemkalk wird, nachdem er schon gebraucht und seine Absorptionsfähigkeit erschöpft war, wieder absorptionsfähig, da durch die oben genannte Reaktion wieder NaOH freigesetzt wird.
Die Löslichkeit des CO_2 ist nicht dem Partialdruck des CO_2 im Absorber proportional, sondern direkt proportional dem Entzug an CO_2 beziehungsweise H_2CO_3 durch Hydroxidionen. Von daher ist es verständlich, daß die Geschwindigkeit der Umsetzung des CO_2 in direkter Beziehung zu den verfügbaren OH-Ionen steht. Die Reaktion von H_2CO_3 und NaOH verläuft sehr schnell. Das bedeutet, daß die OH-Ionen schnell verbraucht sind. Daher bestimmt die Schnelligkeit der Reaktion von Calciumhydroxid mit Natriumcarbonat die gesamte Reaktionsgeschwindigkeit.

Der Regenerationsvorgang spielt sich also ständig während der ganzen Absorptionsdauer ab. Die Hauptarbeit leistet hierbei das Calciumhydroxid. Wenn das Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat umgewandelt ist, findet keine CO_2-Absorption mehr statt.
Bei einem Überschuß an Kohlensäure bilden sich auch Bikarbonate. Mit dem Natriumcarbonat würde die Kohlensäure folgendermaßen reagieren:

$$Na_2CO_3 + H_2O + CO_2 - 2\,NaHCO_3$$

Diese Reaktion ist allerdings zweitrangig und spielt für die klinische Verwendbarkeit keine Rolle.
Die Reaktionen bei Absorberkalk, der Bariumhydroxid enthält, verlaufen dementsprechend:

$$H_2CO_3 + Ba(OH)_2 - BaCO_3 + 2\,H_2O$$

$$BaCO_3 + Ca(OH)_2 - CaCO_3 + Ba(OH)_2$$

III. Der Atemkalk

a) Anteil des Natriumhydroxids im Atemkalk

Es wurde schon darauf hingewiesen, daß heute die Atemkalke aus einem Gemisch von Calciumhydroxid und Natriumhydroxid oder Calciumhydroxid und Bariumhydroxid bestehen.
Der Anteil des NaOH wird ziemlich klein gehalten, etwa 4% bis 5%. Höhere Konzentrationen wären natürlich ebenfalls wirksam, aber dann würde der Atemkalk zu hygroskopisch, und die Wärmeentwicklung, die ja auch so schon beträchtlich ist, würde noch gesteigert.
Ein sehr wesentliches Problem stellt die Tatsache dar, daß diese Hydroxide sehr leicht zu Staub zerfallen. Dies darf aber unter keinen Umständen geschehen, da dieser Staub die Schleimhäute der Patienten sehr reizen würde. Andererseits kann auch schlecht ein feinmaschiger Filter in das System eingebaut werden, der die Staubteile zurückhalten würde. Er hätte nämlich zur Folge, daß sich der Strömungswiderstand erheblich erhöhen würde, was sich auch wieder nachteilig auf den Patienten auswirken würde.

b) Die Härtung des Atemkalkes

Um zu verhindern, daß der Atemkalk in Staub zerfällt wird Kieselgur daruntergemischt, das aus Überresten von winzigen Fossilien, den Diatomeen, gewonnen wird. Hauptbestandteil ist das Siliciumdioxid (SiO_2). Der Siliciumdioxidanteil muß sorgfältig gewählt sein,

denn je größer der Anteil, um so härter ist der Atemkalk. Der harte Atemkalk zerfällt zwar nicht mehr so leicht und bildet weniger Staub, aber mit Zunahme der Härte läßt auch die Absorptionsfähigkeit nach.
Ein anderes Härtungsmittel ist der Zement.

c) Die Körnchenbeschaffenheit

Ein weiterer wichtiger Faktor, der die Absorptionsleistung des Kalkes beeinflußt, ist die Größe der Atemkalkkörnchen. Die Größe der Atemkalkkörnchen bestimmt die Größe der zur Verfügung stehenden Oberfläche. Je kleiner die Körnchen sind, um so größer ist die aktiv werdende Oberfläche. Andererseits steigt aber auch mit abnehmender Körnchengröße der Strömungswiderstand.
Es gilt auch hier, einen besonders effektiven Mittelweg zu finden, der bei nicht zu großem Strömungswiderstand noch gute Absorption aufweist.
Heute sind die Körnchen meist durchschnittlich 3-5 mm groß. Dabei ist es wichtig, daß die Körnchengröße nicht zu sehr variiert, denn sonst setzen sich die kleineren Körnchen in die Lücken zwischen den großen Körnchen, und der Strömungswiderstand steigt beträchtlich an.
Heute haben die meisten Körnchen Granulaform mit unregelmäßiger Oberfläche. So halten die Körnchen die Feuchtigkeit recht gut.

d) Die chemische Zusammensetzung der Atemkalke

Die Atemkalke enthalten Wasser. Beim Bariumkalk ist das Wasser als Kristallwasser in Form des Bariumoctohydrates, $Ba(OH)_2 \times 8\ H_2O$, enthalten.
Beim Natronkalk gibt es zwei verschiedene Arten, den "trockenen Kalk" mit 2% Wasser und den "nassen Kalk", der 14% - 19% Wasser hat. Feuchtigkeit ist nötig, um zu einer effektiven Absorption zu gelangen. Das CO_2 muß in Wasser gelöst sein, um mit NaOH reagieren zu können.
Für das Kreissystem ist der nasse Kalk geeigneter.
Die chemische Zusammensetzung von Natronkalk (Beispiel: Drägersorb^R) besteht aus:

$Ca(OH)_2$	80%
NaOH	3%
H_2O	15%
Fe_2O_3, Al_2O_3	2%
MgO, Indikator	

Der Bariumkalk (Beispiel: Baralyme^R) besteht aus:

$Ca(OH)_2$	80%
$Ba(OH)_2 \times 8\ H_2O$	20%

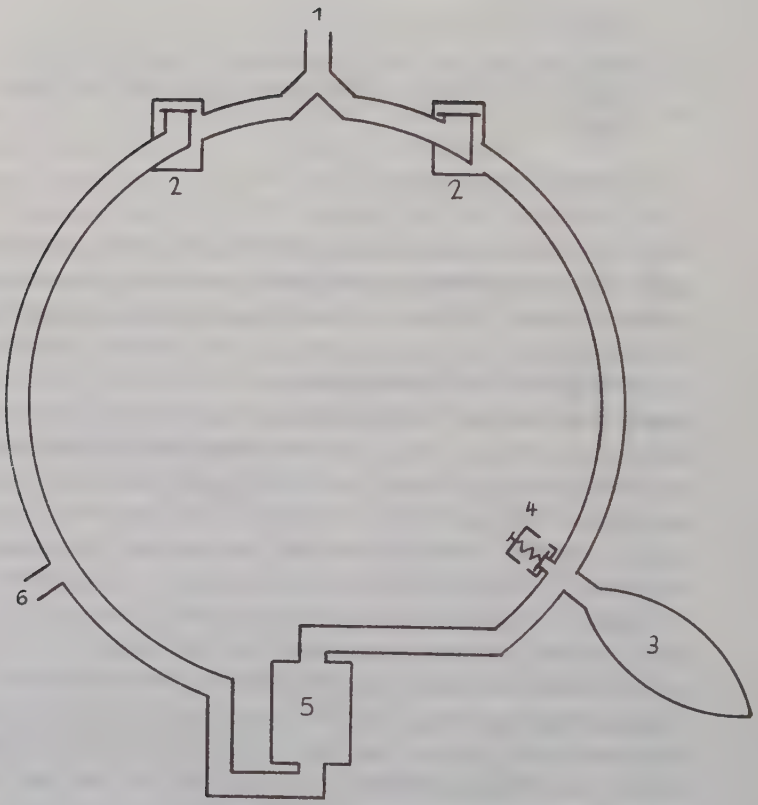
Gelegentlich wird vor Gebrauch in den frisch gefüllten Absorber "ein Schuß Wasser" (20-50 ml) hineingegeben, um so dessen initiale Absorptionsfähigkeit zu verbessern. Im weiteren Verlauf erübrigt sich dies, da bei der Reaktion fortlaufend H_2O frei wird.

IV. Untersuchung der CO_2-Absorption verschiedener Atemkalke in Absorberkanistern unterschiedlicher Bauart

a) Versuchsanordnung

Es gibt verschiedene Atemkalkfabrikate, die natürlich auch eine etwas unterschiedliche chemische Zusammensetzung haben. Diese verschiedenen Atemkalke galt es in der Arbeit auf ihre Leistung, auf ihre CO_2-Absorptionsfähigkeit, zu untersuchen.
Wegen der starken individuellen Schwankungen bei den Patienten, hat es keinen Sinn, Messungen der Kohlensäureabsorption während des klinischen Einsatzes vorzunehmen. Man würde nur schwerlich zu exakten Ergebnissen kommen. Deshalb wurden hier in den Versuchen angestrebt Bedingungen zu erzielen, die dem Inhalationsnarkosevorgang annähernd gleichen, die aber dennoch objektivierbare Meßergebnisse zulassen.
In der Narkosetechnik wird heute hauptsächlich das Kreissystem benutzt. Das Prinzip ist, daß der Patient das Gas nicht in den Raum aus-, sondern die Gase wieder in das Schlauchsystem zurückatmet, in dem der Gasstrom, bedingt durch zwei Richtungsventile, nur in einer Richtung fließt. Das Frischgas mit den Narkosemitteln wird in das Kreissystem hineingeleitet, die Kohlensäure durch den CO_2-Absorber eliminiert. Der Patient atmet so durch das Kreissystem ein und aus. Dadurch werden Gas und Narkosemittel gespart.

In Anlehnung an ein solches Kreissystem wurde die Versuchsanordnung aufgebaut. Als "Lunge" wurde ein sogenannter Übungsthorax verwandt. Er besteht aus einem



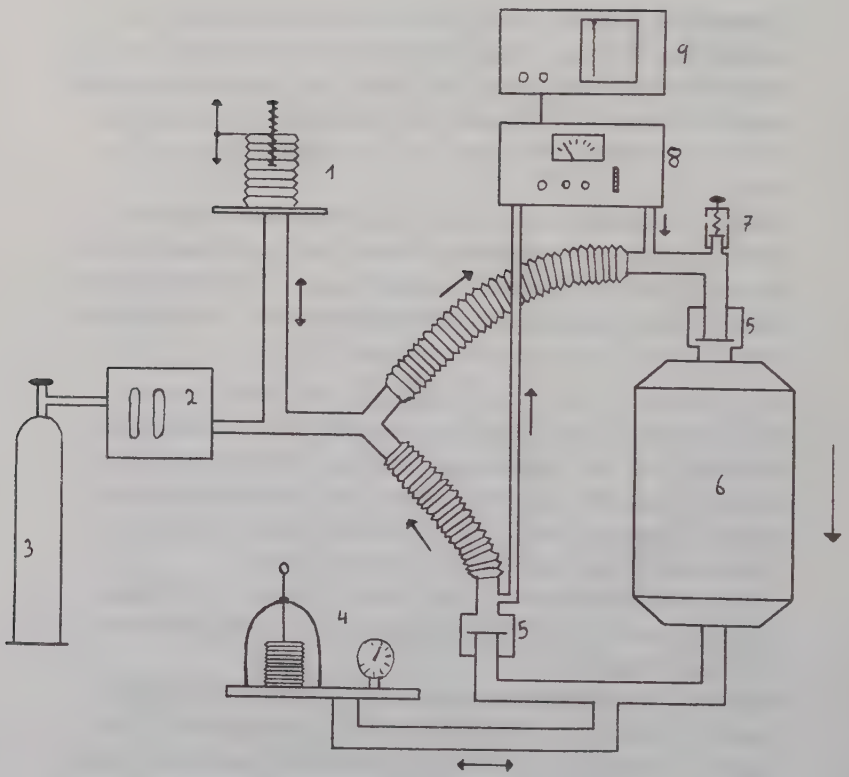
Schema eines Kreissystems
1 = Verbindung zur Atemmaske
2 = Richtungsventile
3 = Atembeutel
4 = Überdruckventil
5 = Absorberkanister
6 = Frischgaszufuhr

Blasebalg, dessen elastischer Widerstand beim Aufblasen durch eine Feder dargestellt wird, und so dem elastischen Widerstand des Thorax in etwa entspricht, wenn er künstlich beatmet wird. Dasselbe gilt auch für die Ausatmung bis in den subatmosphärischen Bereich.
Über eine Mischpumpe wurde der Kohlensäurezustrom genau geregelt. Damit wurde mit der Zeitnahme genau die zugeführte CO_2-Menge berechenbar. Mit der Mischpumpe wurde gleichzeitig auch Sauerstoff beziehungsweise Frischluft dem System zugeführt.

Zur Beatmung diente ein Pulmomat der Firma Dräger. Der Pulmomat preßt das Gasgemisch in die Lunge und erzeugt für die Ausatmung einen geringen Unterdruck. Durch einen Druckmesser können die Beatmungsdrucke kontrolliert werden. Der Pulmomat wird entweder mit Sauerstoff oder mit Druckluft betrieben.
Außer dem Atemkalkkanister enthielt die Versuchsanordnung noch ein Überdruckventil in Gasflußrichtung vor dem Absorber.
Zwischen Einatmungsschenkel und Ausatmungsschenkel wurde in einem Nebenschluß ein CO_2-Analysator, der nach dem Prinzip der Ultrarot-Absorptionsschreibung (URAS) arbeitet, geschaltet. Der URAS war mit einem Direktschreiber verbunden. So konnte ein "CO_2-Durchbruch" bereits in seinen Anfängen beobachtet werden.

b) Versuchsdurchführung

Es wurden drei verschiedene Atemkalksorten untersucht:



Halbschematische Skizze der Versuchsanordnung
(in Anlehnung an J. Netzer und H. Oehmig)

1 = Übungsthorax
2 = Mischpumpe
3 = CO_2-Flasche
4 = Pulmomat
5 = Richtungsventile
6 = Absorber
7 = Überdruckventil
8 = URAS
9 = Direktschreiber

Drägersorb^{R}, ein Atemkalk des Drägerwerks
Sodasorb^{R}, hier vertrieben von der Rhein-Pharma Arzneimittel GmbH
Baralyme^{R} von der Chemetron Corporation, Chicago.

Während es sich bei Drägersorb und Sodasorb um Natrium-Kalke handelt, ist Baralyme ein Bariumkalk. Die Untersuchung ist daher auch ein Vergleich zwischen Bariumkalk und Natriumkalk.
In den Versuchen wurden Absorptionskanister verschiedener Bauart benutzt. Dabei wurden Modelle der Firma Dräger eingesetzt und zwar:
Ia, IIa und IIIa.
Außerdem wurden noch zwei amerikanische Modelle einer etwas anderen Bauart benutzt:
ein Atemkalkkanister von Frazer-Sweatman und ein System von Schreiber.
Die Kanister wurden jeweils bis zur normalen Füllhöhe mit den verschiedenen Kalksorten versehen.

Über die Mischpumpe strömten pro Minute 400ml CO_2 und ca. 250 ml O_2 in das Kreissystem.
Der Pulmomat wurde auf ein Atemvolumen von 500ml eingestellt und führte die Beatmung mit einer Frequenz von 16 Atemzügen pro Minute aus (AMV = 8l/min).

Aus dem Einatmungsschenkel strömte mit Hilfe einer Membranpumpe ein kontinuierlicher Gasstrom durch den URAS. Die CO_2-Werte wurden fortlaufend von dem mit dem URAS gekoppelten Direktschreiber aufgezeichnet.

c) Versuchsergebnisse

Die erhaltenen Kurven haben alle im Prinzip die gleiche Form. Nach einem langen Verharren auf der Nullinie steigt die Kurve dann relativ steil an. Die Erklärung liegt auf der Hand: Wenn die Absorptionskapazität des Kalkes zu Ende geht, steigt der CO_2-Gehalt des Gasgemisches relativ schnell an, während vorher das gesamte CO_2 durch den Kalk gebunden wurde.
Die Messungen wurden bis zu einem Durchbruch von einer zweiprozentigen CO_2Konzentration durch den Absorber vorgenommen.
In der Absorptionsleistung der Kalke wurde eine deutliche Differenz bemerkt.
In diesen Untersuchungen erwies sich der Atemkalk, der von der Rhein Pharma Arzneimittel GmbH vertrieben wird, das Sodasorb, als der Kalk, der am längsten das CO_2 vollständig absorbierte.
Bei Baralyme^R, dem Bariumkalk, wurde ein relativ frühzeitiger Durchbruch geringer CO_2-Mengen bemerkt. Allerdings stieg die durchgelassene CO_2-Menge nicht so schnell an wie bei Drägersorb^R, bei dem der CO_2-Durchbruch zwar später einsetzte, die CO_2-Konzentration dann aber meistens schneller anstieg als bei Baralyme.

Dazu muß gesagt werden, daß diese Werte sich allerdings nur auf die normale Füllmenge in den verschiedenen Absorbern beziehen. Sie sagen nichts über die Leistung des Kalkes bezogen auf ein bestimmtes Gewicht.

	Sodasorb	Drägersorb	Baralyme
Dräger Ia	250	177	208
Dräger IIIa	308	279	291
Dräger IIa	185	160	145
Frazer-Sweatman	353	262	284
Schreiber	387	304	363

In dieser Tabelle wird angegeben, wieviel Minuten der Absorber mit dem jeweiligen Atemkalk in das System eingeschaltet war, bis er 2% CO_2 durchließ.

Eine zweite Frage muß dann folgerichtig gestellt werden: die der Absorptionsleistung, bezogen auf ein bestimmtes Gewicht Atemkalk. Dazu wurden die oben angeführten Werte, die bei normaler Kanisterfüllung erhalten wurden, auf die Zeit umgerechnet, die benötigt wurde, um 100 g des jeweiligen Atemkalkes soweit auszunutzen, daß er 2% CO_2 durchlassen würde, d.h., die gefundenen Werte sind rechnerische Ergebnisse.
Eindeutig war Sodasorb auch unter diesem Gesichtspunkt die beste von den getesteten Atemkalksorten.

Sodasorb und Drägersorb sind etwa gleich schwer, dagegen ist die gleiche Füllmenge Baralyme wesentlich schwerer.
Mit der Zeit, die benötigt wird, um bei 100 g Atemkalk 2% Kohlendioxid durchzulassen, hat man gleichzeitig einen Wert, mit dem man die Ausnutzung des gleichen Atemkalkes in den einzelnen Absorbersystemen vergleichen kann.

So wurden für Sodasorb folgende Werte gefunden:

Dräger Ia	43,9 min
Dräger IIIa	41,3 min
Dräger IIa	36,9 min
Frazer-Sweatman	53,6 min
Schreiber	49,6 min

Es fiel auf, daß die Ausnutzung im Drägermodell IIa doch erheblich schlechter ist als in den anderen Systemen.

Beim Bariumkalk ergab sich folgendes Bild:

Dräger Ia	33,0 min
Dräger IIIa	38,4 min
Dräger IIa	26,8 min
Frazer-Sweatman	36,2 min
Schreiber	40,0 min
Schreiber mit Einmal-Packung	37,1 min

Hierbei wurde deutlich, daß die Ausnutzung des Atemkalkes mit Zunahme des Absorberkanistervolumens und damit mit Zunahme der Kalkmenge stieg.

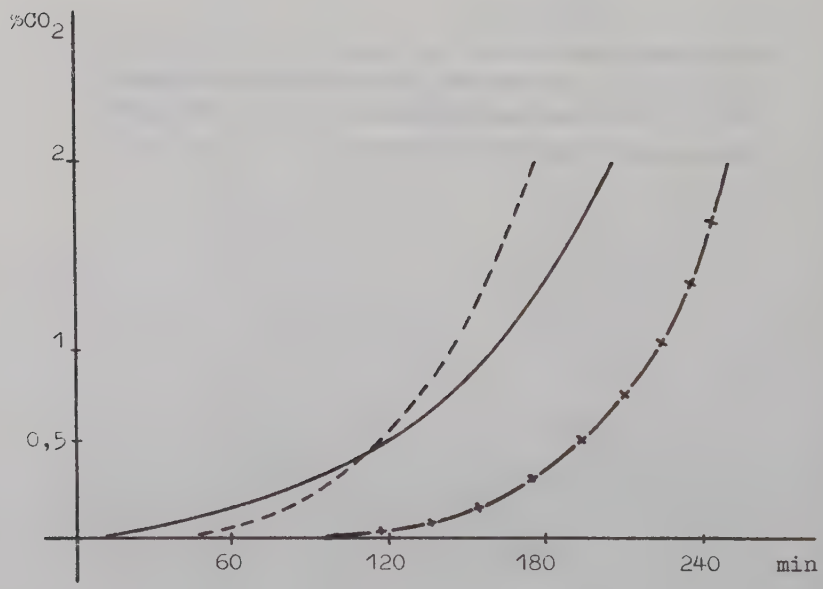
Da Barium etwas langsamer reagiert als Natrium, ist es nicht verwunderlich, daß die Leistung bei größerem Volumen besser ist, wobei das Gasgemisch also auch länger mit den Kalkgranula in Berührung bleibt. Dann erzielt dieser Bariumkalk eine sehr gute Absorptionsfähigkeit.

Beim Drägersorb zeigte sich eine ähnliche Tendenz:

Dräger Ia	30,9 min
Dräger IIIa	38,4 min
Dräger IIa	32,2 min
Frazer-Sweatman	36,6 min
Schreiber	39,2 min

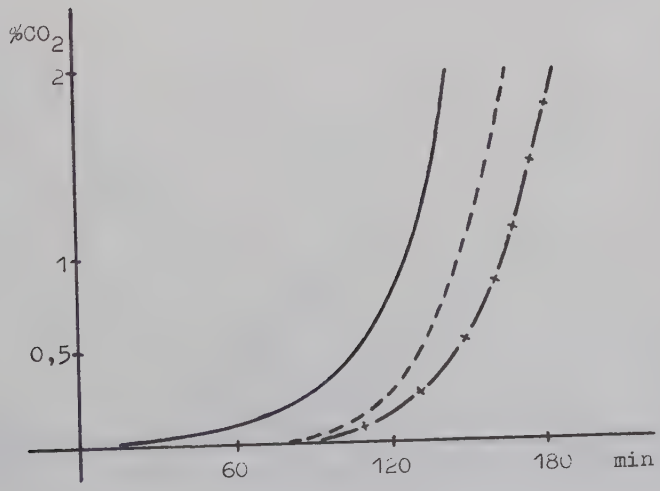
Auch hier zeigte sich deutlich, daß die Absorptionsleistung mit zunehmendem Absorberkanistervolumen stieg. Der Trend zu größeren Absorbern ist daher verständlich und begrüßenswert.

Die Absorptionskurven des Modells Dräger Ia



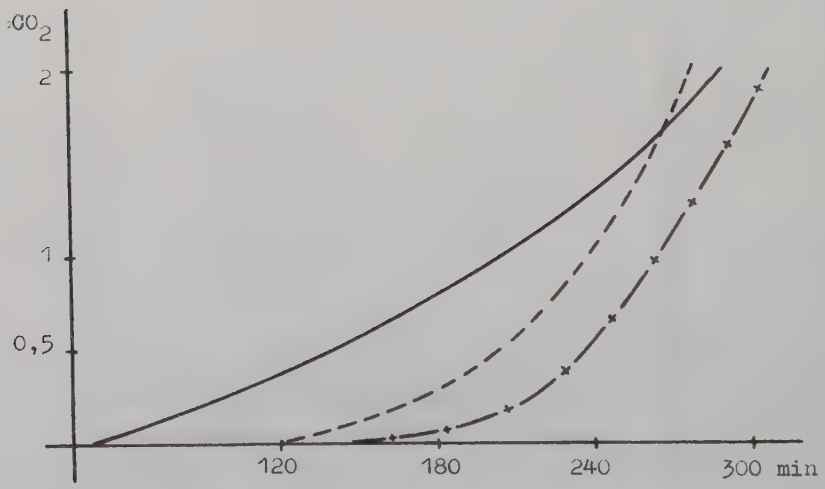
Sodasorb ——+——
Drägersorb- - - - -
Baralyme ————

Die Absorptionskurven des Modells Dräger IIa



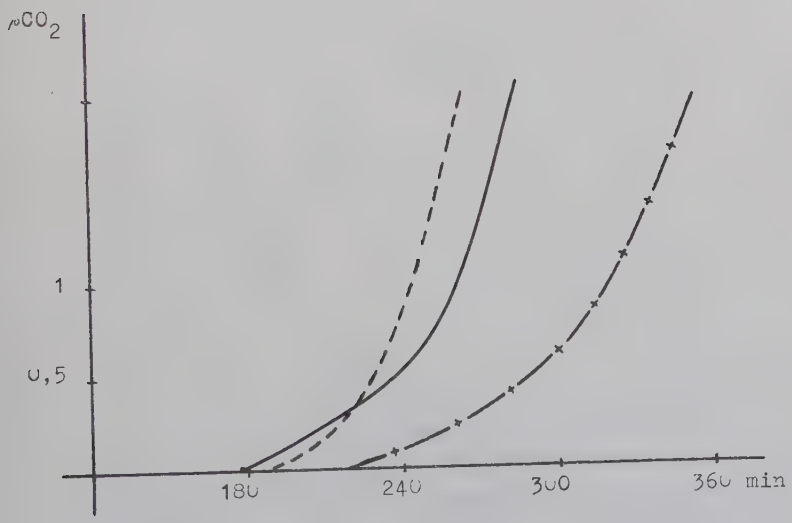
Sodasorb ——+——
Drägersorb - - - - -
Baralyme ————

Die Absorptionskurven des Modells Dräger IIIa



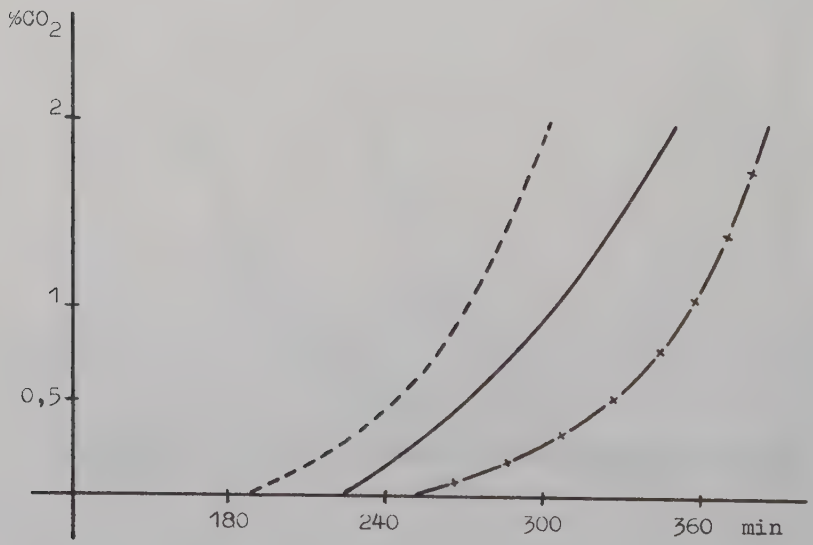
Sodasorb —— + ——
Drägersorb - - - - - -
Baralyme ————

Die Absorptionskurven des Modells Frazer-Sweatman



Sodasorb —— + ——
Drägersorb- - - - -
Baralyme ————

Die Absorptionskurven des Modells Schreiber

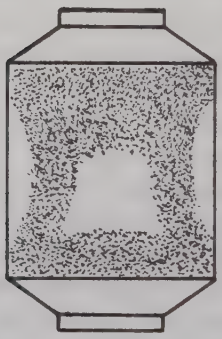


Sodasorb ——+——
Drägersorb- - - - -
Baralyme ————

c) Diskussion

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, daß der Absorberkalk Sodasorb der beste der getesteten Kalksorten ist. Natürlich muß man beachten, daß die Prüfung nicht ganz der klinischen Situation entspricht. Vor allem wird ein zu hohes CO_2-Angebot gegeben, da für den Einsatz am Patienten mit ungefähr 200 - 300 ml/ min zu rechnen ist. Wie früher schon nachgewiesen wurde, verringert sich die Zeitwirksamkeit damit nicht nur um die Hälfte sondern um etwas mehr. Nun mag es sein, daß der Bariumkalk, der etwas langsamer reagiert, durch dieses unphysiologische Überangebot etwas schlechter abschneidet als im klinischen Einsatz. Aber es scheint so zu sein, daß dieser Faktor keine große Rolle spielt.
Obwohl versucht wurde im Kreissystem eine optimale Dichtigkeit zu erzielen, muß damit gerechnet werden, daß ein gewisser Prozentsatz des Gases durch Undichtigkeiten ständig entweicht und nicht zum Absorber gelangt. Man könnte vermuten, daß durch die verschiedene Form und Größe der Absorberkanister und die etwas unterschiedliche Beschaffenheit der Kalksorten ein verschieden großer Widerstand entstehen würde, der eine unterschiedlich große Gasaustrittsmenge aus Undichtigkeiten zur Folge hätte. Wie aber in anderen Versuchen schon nachgewiesen wurde, ist der Widerstandsunterschied in den verwendeten Absorbern doch so gering, auch bei den verschiedenen Kalksorten, daß dieser Faktor sicher nicht in Betracht kommt, das Ergebnis deutlich zu beeinflussen.

Die Ausnutzung des Atemkalks hängt mit der Form des Absorberkanisters zusammen. Das Gas strömt ja nicht an allen Orten gleichmäßig durch den Kanister sondern in Abhängigkeit von Form und Lage an bestimmten Stellen bevorzugt. So durchströmt es bei den heute üblichen und in Versuchen verwendeten zylindrischen Atemkalkkanistern bevorzugt die Randpartien, während in der Mitte fast keine Absorption geschieht.



Zonen der Absorption im Absorber (nach W. RIEDEL und K. STEINBEREITHNER)

Bei den Absorbern mit den größeren Volumina, die im Verhältnis zur Länge einen größeren Durchmesser aufweisen, wird prozentual mehr Kalk von dem Gas umströmt als bei den kleineren Absorbertypen. Dadurch kommt es zu der besseren Kalkausnutzung.

V. Widerstandsänderungen in Absorbern während der CO_2-Absorption

Wie schon oben dargelegt, reagiert der Atemkalk mit der Kohlensäure, und es entsteht daraus als letztes Reaktionsprodukt das Calciumcarbonat. Damit entsteht aber ein neuer Stoff im Absorber.
Nun wird oft davon gesprochen, daß die Granula des Atemkalkes während der Absorption verbacken, sei es durch die chemische Reaktion, sei es durch die Feuchtigkeit, die sich in dem Absorberkanister ansammelt. Die Frage, die hierbei interessierte, ist die, ob sich durch diese Verbackungen der Strömungswiderstand erhöht.

a) Die physikalischen Voraussetzungen

Wenn ein Gas durch eine Röhre strömt, so ist die Strömungsgeschwindigkeit abhängig von dem Druckgefälle zwischen Anfang und Ende der Röhre, dem Durchmesser der Röhre und der Viskosität des Gases.

$$\text{Strömungsgeschw.} \sim \frac{\text{Gesamtdruck-Abfall}}{\text{Länge d. Röhre}} \; (\text{Durchm})^4 \; \frac{1}{\text{Viskos.}}$$

$$\text{Druckverlust} \sim \frac{\text{Länge d. Röhre}}{(\text{Durchmesser})^4} \; \text{Viskos.} \; \text{Volumengeschw.}$$

und als Gleichung:

$$\text{Druckverlust} = f \; \text{Visk.} \; \frac{\text{Länge d. Röhre}}{(\text{Durchmess.})^4} \; \text{Volumengeschw.}$$

$$J = \frac{\pi \, r^4 \, (p_1 - p_2)}{8 \, \eta \, l}$$

Hagen-Poiseuille'sches Gesetz

$$p_1 - p_2 = \frac{J \, 8 \, \eta \, l}{\pi \, r^4}$$

Bei diesen Gleichungen ist p_1 der Druck am Anfang der Röhre und p_2 der Druck am Ende der Röhre. J ist die Volumenmenge, die in der Zeit t ausfließt, r = der innere Radius des Rohres, l = die Länge des Rohres und η = der Koeffizient der inneren Reibung.

Dieses Gesetz gilt nur für die sogenannte laminare Strömung.

Wenn ein Gas eine bestimmte kritische Geschwindigkeit überschreitet, dann strömt es nicht mehr gleichmäßig. Es treten auf der ganzen Rohrlänge Wirbel auf, und es kommt zur sogenannten turbulenten Strömung. Diese kritische Geschwindigkeit, bei der das Gas von der laminaren in die turbulente Strömung übergeht, ist direkt proportional dem inneren Durchmesser der Röhre. Außerdem wird sie bestimmt von dem Verhältnis des Viskositätskoeffizienten zur Dichte des Gases. Dieses Verhältnis gibt die kritische Reynolds'sche Zahl wieder.

Der Widerstand, der einer Strömung entgegensteht, ist gleich dem Druckabfall zwischen 2 Punkten. Er ist bei laminarer Strömung direkt proportional der Strömungsgeschwindigkeit. Er hängt dabei hauptsächlich von dem Leitungsquerschnitt ab (r^4).

Bei turbulenten Strömungen steigt der Druckverlust erheblich mehr, mindestens mit der zweiten Potenz, an.
Der Widerstand der Atemgeräte setzt sich aus laminaren und turbulenten Anteilen zusammen. Zu den turbulenten Anteilen kommt noch hinzu, daß sich durch Hindernisse in der Strombahn lokale Turbulenzen bilden können, die dann den Widerstand ebenfalls erhöhen.

b) Die Versuchsordnung

Wenn wir die physikalischen Betrachtungen in Erwägung ziehen, müssen wir erwarten, daß es durch Verbackungen des Atemkalkes während der Absorption, zu neuen Turbulenzen kommen kann und somit der Widerstand größer wird. Andererseits muß auch berücksichtigt werden, daß der Gasstrom einen Weg durch den Absorber bahnt, der dann vielleicht nicht so sehr von Veränderungen im Sinne von lokalen Hindernissen betroffen wird.
Dazu wurden folgende Versuche gemacht:
Die Versuchsanordnung der ersten Versuchsreihe konnte weitgehend beibehalten werden.

Die Mischpumpe brachte zu den 400 ml CO_2 pro Minute jetzt Luft in das System statt bisher O_2.
Vor dem Absorber und hinter dem Absorber wurden nun zwei Meßköpfe mit Stathamelementen angebracht.
Dabei ist es wichtig, daß die Druckmesser so nahe wie möglich an dem zu vermessenden Absorber sind, damit man den Widerstand des Absorbers mißt und nicht noch zusätzlich den der Schlauchstücke.

Die Stathamelemente haben über einem Hohlraum, dem sogenannten Dom, eine Metallmembran, die sich auf Druckänderung hin etwas verbiegt. Diese Veränderungen werden über eine Brückenschaltung in ein elektrisches Signal umgewandelt und verstärkt (Typ: P 23 Db).
Die Stathamelemente sowie der URAS wurden mit einem Mehrfachdirektschreiber der Firma Hellige gekoppelt (MR 76).

c) Die Versuchsdurchführung

Auch in dieser Versuchsreihe wurden wieder die vorher benutzten Atemkalksorten verwandt und in mehreren Absorberkanistern getestet. Es wurden hierfür drei Absorbermodelle ausgewählt, und zwar die Drägermodelle Ia und IIIa und das Modell von Frazer-Sweatman.
Über eine Mischpumpe wurde kontinuierlich CO_2 (400 ml/min) dem System zugeführt.
Die Drucke vor dem Absorber und hinter dem Absorber sowie der Differenzdruck von Druck 1 minus Druck 2 wurden ständig von dem Mehrfachschreiber aufgezeichnet. Nebenher wurde auch kontinuierlich die CO_2-Konzentration mit aufgetragen.

d) Die Versuchsergebnisse

In acht von neun Versuchen zeigte sich, daß der Widerstand sich erniedrigte, während der Atemkalk CO_2 absorbierte.
Hierbei wurden die Messungen nicht zum gleichen Zeitpunkt verglichen, sondern in einem Moment gleicher Kohlendioxiddurchlässigkeit. Der Grund hierfür ist wohl ersichtlich, da durch die unterschiedliche Bauart der Absorberkanister und durch die verschieden gute Absorptionsleistung die Zeitpunkte für eine bestimmte Kohlensäuredurchlässigkeit unterschiedlich sind.
Die einzige Ausnahme machte der Versuch mit dem Baralyme-Kalk, aber auch nur in dem Absorbermodell Dräger IIIa. Hier nahm der Widerstand um einige mm Hg zu.
Bei manchen Kurven ließ sich gegen Ende trotz der allgemeinen Abnahmetendenz wieder ein leichter Anstieg bemerken.

e) Diskussion der Versuchsergebnisse

Die Versuche zeigen eindeutig, daß der Widerstand während der Absorption in den Absorbern abnimmt. Dadurch wird deutlich, daß der Kanalisierungseffekt doch stärker zu beachten ist, als ursprünglich angenommen.
Durch die Kanalisierung werden gewisse Bahnen geschaffen, in denen das Gas bevorzugt strömt. Diese Bahnen werden während der Zeit der Absorption an-

scheinend stärker ausgebaut und leichter durchgängig. Dadurch wird die Strömung des Gases begünstigt, der Widerstand wird niedriger. Besonders einsichtig wird das, wenn man bedenkt, daß durch die ungleichmäßige Oberfläche, durch die Hindernisse im strömenden Gasfluß lokale Turbulenzen entstehen, die die Widerstände mit verursachen. Man kann annehmen, daß gerade diese lokalen Turbulenzen verringert werden, und so zur Widerstandserniedrigung beitragen.
Während der Absorptionsvorgänge sammelt sich Wasser teils als Reaktionsprodukt, teils durch die Feuchtigkeit der Ausatemluft in den Absorberkanistern an. Es ist denkbar, daß das Wasser auch die Unebenheiten der Kalkgranula etwas ausgleicht und somit zur Widerstandserniedrigung beiträgt.
Den Herstellerfirmen der Atemkalke scheint es gelungen zu sein, dem Absorberkalk bei guter Absorptionsleistung einen Härtegrad zu geben, der umfangreichere Verbackungen ausschließt. Dadurch tritt diese Ursache, die früher zu den starken Strömungswiderstandsanstiegen führte, heute weitgehend in den Hintergrund.

Ein gewisses Problem stellte diese Apparatur mit den Stathamelementen selbst dar. Es war nur schwer möglich, den Nullpunkt unverändert beizubehalten. Das Gerät zeigte immer wieder Schwankungen, die ausgeglichen werden mußten, wodurch Reproduzierbarkeit erreicht werden konnte.

VI. Zusammenfassung

Bei den Untersuchungen der CO_2-Absorptionsfähigkeit der Atemkalke Sodasorb^R, Drägersorb^R und Baralyme^R ergaben sich deutliche Unterschiede.
Es stellte sich heraus, daß Sodasorb der Kalk ist, der von den getesteten Sorten am längsten einen CO_2-Durchtritt durch den Absorber verhindert. Auch der Bariumkalk Baralyme konnte recht gute Ergebnisse erzielen, besonders in den Kanistern mit einem größeren Volumen. Bei kleinen Absorbermodellen fiel auf, daß er sehr frühzeitig begann, etwas Kohlendioxid durchzulassen, was sicher ein Zeichen größerer Reaktionsträgheit ist.
Bei Drägersorb^R stieg die durchgelassene CO_2-Menge schneller an als bei Baralyme^R. Dadurch wurde von Drägersorb^R die Konzentration von 2% CO_2 schneller erreicht als bei Baralyme^R.

Die Versuche haben gezeigt, daß die Atemkalkausnutzung viel besser ist, wenn man größere Absorberkanister verwendet. Der Strömungswiderstand in den größeren Absorbern ist nicht sehr viel kleiner als in den kleineren Modellen. Da der Atemkalk während der Absorption nicht mehr sehr stark verbackt und der Strömungswiderstand sogar vermindert wird, ist der Bau von Absorbern mit größerem Volumen und der Einsatz von 2 Atemkalkkanistern hintereinandergeschaltet sehr begrüßenswert.

Literaturverzeichnis

Adriani, J.:
The chemistry of anaesthesia
Oxford: Blackwell Scientific Publications 1946

Barth, L., u. M.Meyer:
Moderne Narkose
Jena: VEB Gustav Fischer 1962

Frey, R., W.Hügin u. O.Mayrhofer:
Lehrbuch der Anaesthesiologie
Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1955

Hügin, W.:
Die Grundlagen der Inhalationsnarkose
Basel: Benno Schwabe & Co. 1951

Killian, H., u. H.Weese:
Die Narkose, ein Lehr- und Handbuch
Stuttgart: Georg Thieme 1954

Macintosh, Sir Robert R., W.W.Mushin u. H.G.Epstein:
Physik für Anaesthesisten
Heidelberg: Dr.Alfred Hüthig GmbH 1961

Netzer, J. u. H.Oehmig: Anaesthesist 5, 169 (1956)

Oehmig, H.: Anaesthesist 4, 45 (1955)

Riedel, W. u. K.Steinbereithner: Anaesthesist 17, 254 (1968)

Schreiber, P.:
Der Narkoseapparat
Berlin-Heidelberg-New York: Springer 1970

Stöcker, L.:
Narkose, eine Einführung
Stuttgart: Georg Thieme 1969

Westphal, W.H.:
Physik
Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1963

Meine akademischen Lehrer waren die Herren Professoren und Dozenten:

Amon
Arndt
Berendes
Bode
Bommer
Braasch
Buchholz
Daume
Dimroth
Dölle
Englhardt
Exner
Friderich
Ganz
Gerdes
Golenhofen
Graul
Hamelmann
Hardewig
Havemann
Hensel
Hess
Heuser
Hildebrandt
Hort
Jacob
Jahnke
Kaffarnik
Karlson
Knauff
Koecke
Koransky
Korb
Kunz
Linneweh
Mahr
Mannheim
Martini
Massarat
Nöth
Oehmig
Petry
Pots
Reim
Riecken
Rodeck
Rohen
Schleyer
Schmid
Schmitz- Moormann
Sekeris
Siegert
Straub
Strohmeyer
Stuke
Thoenes
Voss
Walcher
Wehrmeyer
Wesemann
Willenbockel

Herrn Prof. Oehmig danke ich für die freundliche Überlassung des Themas sowie für alle Hilfe.
Herrn Prof. Müller danke ich für das Correferat.

LEBENSLAUF

Am 3. Mai 1948 wurde ich, Heinz Büchsel, als Sohn des praktischen Arztes Dr. Heinz Wilhelm Büchsel und seiner Ehefrau Ruth geb. Behr in Wixhausen bei Darmstadt geboren.
Seit 1954 besuchte ich in Neu- Isenburg, wohin meine Eltern 1950 gezogen waren, die Volksschule. 1958 wechselte ich in das Goethe- Gymnasium in Neu- Isenburg. Nachdem ich vom Frühjahr 1962 an die Realschule in Neu- Isenburg besucht hatte, wechselte ich 1965 in das Gymnasium in Sprendlingen, Ricarda- Huch-Schule, über und legte dort 1967 die Reifeprüfung ab.
Im Wintersemester 1967/68 begann ich zunächst das Studium der Biologie an der Phlipps Universität Marburg. Nach einem Semester wechselte ich in die medizinische Fakultät über. Das erste Semester Studium der Naturwissenschaften wurde mir nachträglich auf das Medizinstudium angerechnet.
Nach dem Sommersemester 1968 legte ich die naturwissenschaftliche Vorprüfung und nach dem Wintersemester 1969/70 die ärztliche Vorprüfung ab.
Im Wintersemester 1972/73 habe ich mich zum Staatsexamen gemeldet.

Marburg, den 4. März 1973

H. Büchsel

Ich erkläre ehrenwörtlich, daß ich die dem Fachbereich Humanmedizin Marburg zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit dem Titel: "Vergleichende Untersuchungen der CO_2-Absorption verschiedener Atemkalke in Absorbern unterschiedlicher Bauart und Widerstandsänderungen in den Systemen während der CO_2-Absorption" im Anaesthesie-Zentrum der Universität Marburg unter Leitung von Prof. Dr. med. Oehmig mit Unterstützung durch Winfried Weber ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation angeführten Hilfsmittel benutzt habe.
Ich habe bisher an keiner in- und ausländischen Medizinischen Fakultät ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht noch die vorliegende oder eine andere Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Marburg, den 4. März 1973

Richard